

累積損傷度を考慮した簡易液状化解析手法  
—その1 簡易液状化解析手法の提案—

正会員○塩見 忠彦<sup>3</sup> 同 土方勝一郎<sup>1</sup>  
同 貫井 泰<sup>1</sup> 同 横山 治男<sup>1</sup>  
同 柳下 文雄<sup>2</sup> 同 小山 桂介<sup>2</sup>

1. はじめに

地震時の地盤挙動把握のためには、一次元波動論による振動解析がよく行われる。これに対して液状化を考慮する必要がある場合は、有効応力解析法か、液状化判定法により得られる低下剛性を用いた等価線形解析を行うことが多かった。ところが、前者の有効応力解析は、液状化に関する地盤物性の評価に経験が必要で液状化判定方法の一つとして簡便には利用できなかった。

また、一次元波動理論による等価線形解析を用いて、せん断応力の最大値分布を求め、このせん断力と液状化強度試験から得られた液状化強度と比較して液状化の安全率を求めることも多い。ところが、一次元波動論による解析は、地震動によって地中のある層が液状化してもその上層には地震動が伝わり、実際とは異なる状態を解析していることになる。

ここで提案する解析手法は、累積損傷度<sup>1)</sup>により液状化を考慮した地震応答解析手法で、等価線形解析と同程度に簡便な手法である。

2. 簡易液状化解析手法

(1) 解析手法の概要

液状化は、砂がせん断変形を受けることにより、体積変化(ダイレイタンス)を起こす事によって生じる。したがって、液状化時の地震応答を求めるためには、せん断変形と体積変化の関係をj知ること、その関係を地盤の運動方程式に取り込むことが必要となる。前者の関係としては、累積損傷度の考え方がある<sup>2)</sup>。図1に示すようにせん断応力の時刻歴から累積損傷度を求め、累積損傷度から過剰間隙水圧を求める。これによって得られる有効応力からせん断剛性を得る。

ここではこれらの関係を用いて、一般的な地震応答解析法を拡張して液状化を考慮できる手法を構築した。本解析手法では、応答せん断力と応答せん断ひずみの振幅の半波毎に、その半波内の最大せん断応力および最大せん断ひずみをそれぞれ求め、これらから、等価なせん断剛性を求め、この剛性(割線剛性)を用いて時刻歴応答解析の時間ステップを進める。

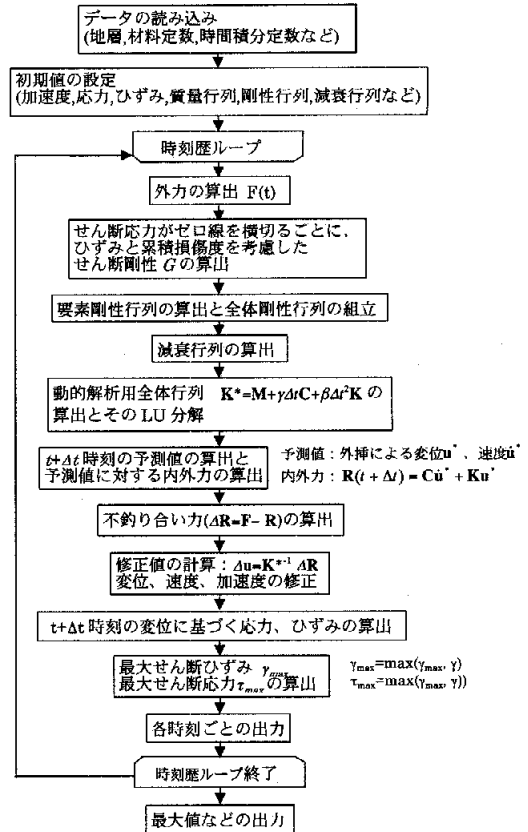
(2) 支配方程式

一般に運動方程式は、式(1)のように表わされる。

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = -M_0\ddot{u}_0 \quad (1)$$

ここで、 $M$  は、土骨格と水をあわせた質量行列、 $C$  は、減衰行列、 $K$  は非排水時の剛性行列、 $\ddot{u}$ 、 $\dot{u}$ 、 $u$  は、それぞれ加速度、速度、変位ベクトルである。 $\ddot{u}_0$  は、入力地震動を示す。 $M_0$  は、底面粘性ダンパーからの入力を考慮した質量ベクトルである。

時間積分には、Newmark-β法を用いた。時間積分に用いる剛性には割線剛性法を用いている。このため、永久変位は計算できない。



※ 但し、 $F$ : 外力、 $t$ : 時刻、 $\Delta t$ : 計算時間間隔(一定とする)、 $\beta$ 、 $\gamma$ : 時間計算法 Newmark-β法における係数(一定)である。

図1 フローチャート

(3) 剛性の算出

剛性は、「ひずみおよび液状化による累積損傷度を考慮したせん断剛性の低下」を考慮し、式(2)で表される。

$$G = G_0 F(\gamma, D) = G_0 \frac{\sigma'_m}{\sigma'_{m0}} \Gamma(\gamma, \gamma_{50}) \quad (2)$$

ここで、 $G$  はせん断剛性、 $G_0$  は、基準平均応力  $\sigma'_{m0}$  の時のせん断剛性、 $\gamma$  はせん断ひずみ、 $D$  は累積損傷度、 $\gamma_{50}$  は、せん断剛性が半分になるせん断ひずみの値で、 $\sigma'_m / \sigma'_{m0}$  の関数である。現在の有効応力  $\sigma'_m$  は、応力評価点の初期平均応力に (1-過剰間隙水圧比 =  $1-r_u$ ) を掛けた値である。

$G$  は、応力時刻歴がゼロ線を横切るときに、前回ゼロ線を横切ってから最大のせん断ひずみ、累積損傷度をともに評価する。図1および図2に計算フローを示す。

図中の各グラフの内①と②は、地盤調査より得られる。

③と④については、実験より一般的な関係を得られる。

①  $G-\gamma$  曲線および  $h-\gamma$  曲線：動的変形試験

② 液状化強度曲線：動的非排水試験

③ 累積損傷度と過剰間隙水圧比の関係：

龍岡らの研究<sup>2)</sup>および Seed らの研究 (式(3))<sup>3)</sup>

$$r_u = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \sin^{-1} \left( 2D^\alpha - 1 \right) \quad (3)$$

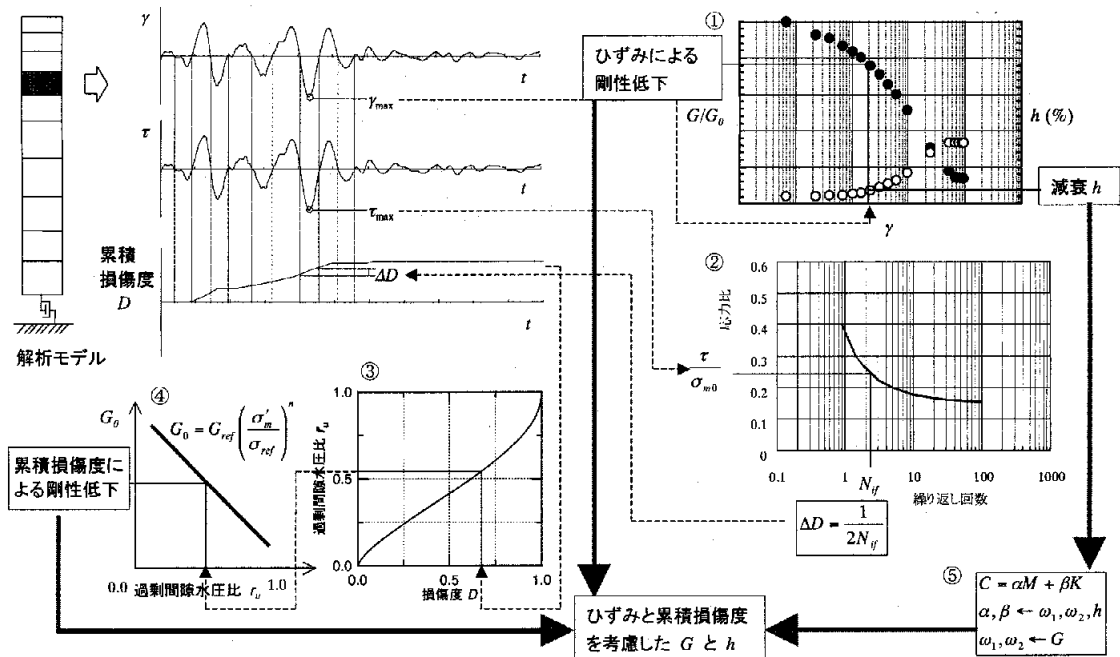


図2 ひずみおよび累積損傷度を考慮した地震応答解析

④ 過剰間隙水圧比とせん断剛性および  $\gamma_{50}$  の関係：実験<sup>4)</sup>より得られている次式を用いる。

$$G_0 = G_{ref} \left( \frac{\sigma'_m}{\sigma'_{ref}} \right)^n \quad \gamma_{50} = (\gamma_{50})_{ref} \left( \frac{\sigma'_m}{\sigma'_{ref}} \right)^n$$

ここで、 $G_{ref}$  は、 $\sigma'_{ref}$  でのせん断剛性、 $(\gamma_{50})_{ref}$  は  $\sigma'_{ref}$  での  $\gamma_{50}$ 、 $\gamma_{50}$  は、 $G/G_0$  が 0.5 となるせん断ひずみである。

⑤ 減衰項の取り扱い

減衰は、レイリー減衰を用い、剛性が変わるたびに再計算する。

3. まとめ

液状化強度曲線より得られる累積損傷度を基に、液状化を考慮した簡便な自由地盤の地震時応答解析を提案した。

【参考文献】

- 1) 吉見 (1991) 砂の液状化(第二版)、技報堂出版
- 2) 龍岡、安田、岩崎、常田(1980) Normalized Dynamic Undrained Strength of sand subjected to cyclic and random loading, 土質学会論文報告集, Vol. 20, NO.3, p.p. 1-26,
- 3) Seed, H. B., Martin, P. P. and Lysmer, J. (1976) Pore-Water Pressure Changes during soil liquefaction, J. of the GT Div. ASCE, GT4, pp.323-346
- 4) 吉澤ほか、SR モデルによる杭基礎建築物の地震応答解析における液状化の考慮方法—その 7 三次元有限要素法による液状化時の地盤剛性の算定—、日本建築学会大会、1999

\*1 東京電力 (株)  
\*2 東電設計 (株)  
\*3 (株) 竹中工務店

Tokyo Electric Power Company  
Tokyo Electric Power Services Co. Ltd.  
Takenaka Corporation